



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 100 27 828 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁷:
G 03 B 42/06
G 01 N 29/00

⑦1 Aktenzeichen: 100 27 828.0
⑦2 Anmeldetag: 5. 6. 2000
④3 Offenlegungstag: 6. 12. 2001

DE 100 27 828 A 1

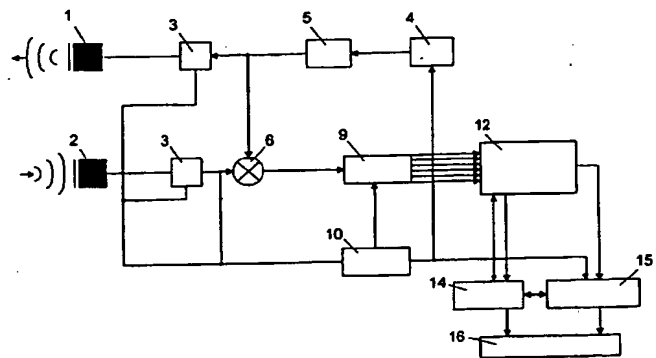
⑦1 Anmelder:
SONEM GmbH, 97076 Würzburg, DE
⑦4 Vertreter:
Lange, H., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 95028 Hof

⑦2 Erfinder:
Glaser, Eckard, 97076 Würzburg, DE; Großmann,
Janet, 97246 Eibelstadt, DE; Wrobel, Miroslaw,
97082 Würzburg, DE
⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
zu ziehende Druckschriften:
DE 199 15 583 A1
DE 43 31 020 A1
US 58 42 991
US 57 29 660
US 52 35 857
US 51 11 823

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤4 Aktives Ultraschall-Sichtgerät

⑤7 Die Erfindung betrifft ein aktives Ultraschall-Sichtgerät, das Objekte in einem Medium erkennbar macht, die in Dunkelheit gehüllt sind, durch einen Rauch- oder Nebelvorhang nicht sichtbar sind oder sich z. B. in trübem Wasser (Hafenbecken, Flußwasser) befinden. Das aktive Ultraschall-Sichtgerät besitzt mindestens einen Sender zum Aussenden eines Sendesignals mit einer beliebigen bekannten Modulationsfunktion und einer mediumabhängigen Bandbreite des Signals, mindestens einen in einer bekannten Position dazu angeordneten Empfänger, denen jeweils eine erste Signalverarbeitungseinheit zur spektralen Zerlegung der von den Empfängern aufgenommenen Antwortsignale nachgeordnet ist, eine zweite Signalverarbeitungseinheit zur Bestimmung der Raumkoordinaten der Reflexionspunkte und ein Display.



DE 100 27 828 A 1

[0001] Die Erfindung betrifft ein aktives Ultraschall-Sichtgerät, das Objekte in einem Medium erkennbar macht, die in Dunkelheit gehüllt sind, durch einen Rauch- oder Nebelvorhang nicht sichtbar sind oder sich z. B. in trübem Wasser (Hafenbecken, Flusswasser) befinden.

[0002] In der Technik ist es auf unterschiedlichen Einsatzgebieten immer wieder erforderlich, ein Sichtgerät zur Verfügung zu haben, mit dem für den Menschen unsichtbare Objekte sichtbar gemacht werden können. Diese Objekte können z. B. in Dunkelheit, Nebel, Rauch, im trübem Wasser oder hinter einem Temperaturvorhang für das menschliche Auge nicht erkennbar sein. In vielen Fällen kommt hinzu, dass trotz der Sichtbarkeit eines Objektes, seine Entfernung nicht abschätzbar ist. Zum Beispiel bei der Bekämpfung eines Brandes kann das zu zusätzlichen Problemen führen.

[0003] In der Vergangenheit haben Infrarotkamera, insbesondere mit Restlichtverstärkung zur Sichtbarmachung warmer Objekte, wie Tiere oder Menschen, breite Anwendung gefunden. Moderne Infrarotsensoren können Temperaturunterschiede bis zu 0,5°C erkennen. Durch eine geeignete Elektronik, die diesen Infrarotkameras nachgeschaltet ist, kann die Empfindlichkeit solcher Geräte wesentlich erhöht werden, wobei sogar eine eventuelle Beleuchtung im sichtbaren Bereich wenig oder nicht stört. Um die Bilder exakt bewerten zu können, ist jedoch ein ausgiebiges Training erforderlich. Für den Einsatz bei einem Brand sind diese Geräte jedoch nur bedingt oder nicht brauchbar, da das Feuer die interessierenden Objekte vollständig abschirmen kann.

[0004] Eine weitere bekannte Vorrichtung ist mit einem Bolometer ausgerüstet. Die Umgebung, in der ein warmes Objekt vermutet wird, wird mit einem Bolometer abgetastet und ein thermisches Bild im mittleren Infrarot (2-5 µm) aufgezeichnet. Dieses Bild weist Temperaturunterschiede bis zu 0,1°C auf. Mit diesem Gerät können auch Objekte in Nebel, Rauch oder anderen Gasen sichtbar gemacht werden, jedoch keine Objekte in einem Feuer oder unter Wasser.

[0005] Ein anderes Verfahren zur Sichtbarmachung von Objekten nutzt den Ultraschall aus. Es wird ein Ultraschallsignal ausgesendet und aus der Laufzeit bis zum Empfang des Antwortimpulses die Entfernung zu einem Objekt ermittelt. In Luft breitet sich der Ultraschall bekanntlich mit ca. 340 m/s aus, ein Objekt in 300 m Entfernung wird also nach etwa 2 s erkannt. Dabei ist zu beachten, dass nur das jeweils am nächsten liegende Objekt erkannt wird.

[0006] Bei einem anderen Verfahren werden Signale ausgesendet, die denen der Fledermaus ähnlich sind. Die als Chirp bezeichneten Signale enthalten ein Muster von Frequenzen. Die Antwortsignale werden dann mit den Sendesignalen verglichen, und die sogenannten "beat-frequencies" heraus gefiltert. Es können mit diesen Geräten alle Objekte im Blickfeld erkannt werden. Diese Geräte wurden vorzugsweise für Blinde entwickelt, die durch ein intensives Training auf das "Hören" von Hindernissen sensibilisiert werden.

[0007] Das menschliche Gehirn ist auch gefragt bei der Ultraschall-Spektroskopie, wie sie für die zerstörungsfreie Materialprüfung verwendet wird. Hier werden die Spektren der Echosignale auf dem Bildschirm angezeigt, und der Betrachter kann aufgrund seiner Erfahrung erkennen, ob sich in dem beschallten Material z. B. ein Riss oder eine Korrosionsstelle oder ähnliches befindet.

[0008] Während bei den ersten genannten Geräten die Laufzeiten der einzelnen Frequenzen zur Auswertung gelangen, werden bei den zweitgenannten die Frequenzverschiebungen des Signalmusters erfasst, das sich bei Reflexion an einem Objekt in dem Antwortsignal wiederfindet. Die Fre-

quenzverschiebung ist proportional der Verzögerung zwischen dem ausgesendeten und dem empfangenen Signal. Dadurch kann auch die Entfernung der Objekte ermittelt werden.

[0009] Um mit diesem Verfahren den Charakter und die Form eines Objektes zu ermitteln, versucht man die Tatsache auszunutzen, dass jedes Objekt eine spezifische Reaktion auf das Signal besitzt. Aus den Klangunterschieden bzw. den Unterschieden von Frequenzmustern der Antwortsignale soll dann ermittelt werden, welche Eigenschaften das Objekt besitzt. Auch hier ist ein aufwendiges Lernsystem erforderlich, um die Objekte zu "hören" bzw. aus typischen Mustern zu erkennen.

[0010] Es sind auch Lösungen bekannt, bei denen versucht wird, aus den Reflexionen an einem unbekannten Objekt das Objekt zu klassifizieren. Allerdings ist die Klassifizierung der Objekte mit einer sehr großen Unsicherheit verbunden, die zur Zeit noch mit 30-40% angegeben wird. Diese Geräte sollen Blinden zur Orientierung helfen. Für den Einsatz zur Brandbekämpfung oder unter Wasser sind auch diese Geräte ungeeignet, da mindestens eine räumliche Vorstellung des Objektes geliefert werden muss.

[0011] Es ist deshalb die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Vorrichtung vorzuschlagen, die auch in einem undurchsichtigen Medium ein dimensionsgetreues Bild in 1D, 2D oder 3D liefert. Die Vorrichtung soll kompakt aufgebaut sein und bei einer Brandbekämpfung, im Einsatz unter Wasser oder als Nachtsichtgerät verwendbar sein.

[0012] Eine weitere Aufgabe besteht darin, ein aktives Ultraschall-Sichtgerät vorzuschlagen, das eine 3D-Darstellung von Objekten in Echtzeit liefert.

[0013] Die Aufgabe wird durch die anhängenden Ansprüche gelöst.

[0014] Das Aktive Ultraschall-Sichtgerät entsprechend der vorliegenden Erfindung besteht aus mindestens einem Sender zum Aussenden eines Sendesignal mit einer beliebigen bekannten Modulationsfunktion und einer mediumabhängigen Bandbreite des Signals, mindestens einem in einer bekannten Position dazu angeordneten Empfänger, denen jeweils eine erste Signalverarbeitungseinheit zur n-kanaligen spektralen Zerlegung der von den Empfängern aufgenommenen Antwortsignale aus dem Medium und ein Speicher-Schieberegister nachgeordnet ist, einer zweiten Signalverarbeitungseinheit zur Bestimmung der Raumkoordinaten, und einem Display. Die erforderliche Bandbreite beträgt unter Wasser etwa 1 kHz bis maximal 10 MHz, in Luft 20-500 kHz. In festen Materialien muss sie so eingestellt werden, dass die Signale in das Medium eindringen können und an eventuell eingebetteten Strukturen reflektiert oder absorbiert werden. Die Anzahl n der Kanäle muss vorher festgelegt werden. Mit dieser Zahl n (z. B. n = 1024) wird eine obere Grenze für die Auflösung des Bildes gegeben.

[0015] In einer vorteilhaften Ausführungsform sind die Empfänger symmetrisch zum Sender angeordnet.

[0016] Dem oder den Empfängern ist in bekannter Weise eine Signalkonditionierung nachgeschaltet, die z. B. aus einem Verstärker und einer Filterbank bestehen kann. Außerdem besitzt das Sichtgerät in ebenfalls bekannter Weise eine Zeitssteuerung.

[0017] Den Empfängern kann jeweils ein Mischer zur Erzeugung der Schwebungsfrequenz zwischen dem Sendesignal und dem Antwortsignalen nachgeordnet werden. Dadurch ist es möglich, die zu verarbeitende Frequenzen herabzusetzen.

[0018] Die Antwortsignale können sowohl analog als auch digital verarbeitet werden. Zur digitalen Verarbeitung ist jeweils vor den ersten Signalverarbeitungseinheiten zur spektralen Zerlegung ein A/D-Wandler vorgesehen.

[0019] Nach der Bestimmung der Raumkoordinaten der Reflexionspunkte in der zweiten Signalverarbeitungseinheit können diese direkt einem Display zugeleitet, und die Grauwerte der Reflexionspunkte können angezeigt werden. Es ist aber auch möglich, dem Speicher-Schieberegister eine Klassifikationseinheit nachzuordnen. Diese Klassifikationseinheit ist ein Prozessor (z. B. ein neuronales Netz), der zunächst die Spektren der einzelnen Kanäle parallel aus dem Speicherschieberegister aufnimmt. Damit werden der Klassifikationseinheit mit jedem Zeitschritt n (z. B. $n = 1024$) Werte zugeführt. Die Klassifikationseinheit kann aus einer Vorverarbeitungseinheit, dem eigentlichen Klassifikator und einer Analyseeinheit bestehen. Die Vorverarbeitungseinheit hat die Aufgabe, die zu klassifizierenden Daten schon einmal vorab zusammenzufassen, zu normieren, zu selektieren o. ä. Der Klassifikator besteht aus einem Prozessor, der die aus der Vorverarbeitungseinheit eingehenden Daten anhand einer Berechnungsvorschrift, also eines mathematischen Modells, umwandelt. Das Berechnungsergebnis gibt z. B. eine Wahrscheinlichkeit an, mit der die eingegangenen Daten zu einer Struktur einer bestimmten Klasse gehören. Die zugrundeliegende Berechnungsvorschrift (also das mathematische Modell) wird im Laufe einer sogenannten Trainingsphase so optimiert, dass eine bestmögliche automatische Zuordnung der Daten zu vorgegebenen Klassen erreicht wird. Die Analyseeinheit hat nun die Aufgabe, die eingegangenen Daten (z. B. der n Variablen) nach ihrer Wichtigkeit für die optimale Klassenzuordnung auszusortieren.

[0020] In dieser Klassifikationseinheit können die Eigenschaften der Reflexionspunkte bewertet und klassifiziert werden oder es werden nur die Reflexionspunkte mit gleichen Spektren zusammengefasst und angezeigt.

[0021] Für die analoge Verarbeitung kann die erste Signalverarbeitungseinheit zur spektralen Zerlegung ein akustooptischer Prozessor, ein holographischer Wavelet-Prozessor oder ein ähnlicher analoger Prozessor zur Spektralzerlegung darstellen.

[0022] Für die digitale Verarbeitung kann die erste Signalverarbeitungseinheit zur spektralen Zerlegung ein Fast-Fourier-Prozessor, ein digitaler Wavelet-Prozessor oder ein ähnlicher digitaler Prozessor zur Spektralzerlegung darstellen.

[0023] Die Klassifikationseinheit kann ein statistischer Klassifikator, wie ein neuronales Netz, eine Support-Vector-Machine oder dergleichen darstellen.

[0024] Die zweite Signalverarbeitungseinheit zur Bestimmung der Raumkoordinaten besteht insbesondere für die digitale Verarbeitung aus einem Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessor, der ebenfalls Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist. Der Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessor besteht aus einem Rastergenerator, einer Einheit zur Bestimmung der Wege der Signale von dem Sender zu den Rasterpunkten und von den Rasterpunkten zu den einzelnen Empfängern für jeden Rasterpunkt, einer Speicherzeile für die zum Empfänger gehörenden Summen aller Amplitudenwerte über die Kanäle der n -kanaligen spektralen Zerlegung, einem Sampling-Address-Generator zur Bestimmung der Adresse der Amplitudenwerte innerhalb der zum Empfänger gehörenden Speicherzeile, und einer Einheit zur mathematischen Verknüpfung der aus den Speicherzeilen entnommenen Amplitudenwerte.

[0025] Bei der analogen Verarbeitung kann auch eine bekannte Triangulation oder ellipsoidale Backprojektion zur Bestimmung der Raumkoordinaten verwendet werden. Wird nur ein Empfänger eingesetzt sind die Koordinaten der Reflexionspunkte unmittelbar bekannt.

[0026] Der Einsatz eines Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessors ist also erst von Vorteil, wenn mindestens zwei

Empfänger vorhanden sind.

[0027] Der Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessor ist ebenfalls Gegenstand der vorliegenden Erfindung. Der Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessor besteht aus einem Rastergenerator, einer Einheit zur Bestimmung der Wege der Signale von dem Sender zu den Rasterpunkten und von den Rasterpunkten zu den einzelnen Empfängern für jeden Rasterpunkt, einer Speicherzeile für die zum Empfänger gehörenden Summe aller Amplitudenwerte entlang der Kanäle der spektralen Zerlegung, einem Sampling-Address-Generator zur Bestimmung der Adresse der Amplitudenwerte innerhalb der zum jeweiligen Empfänger gehörenden Speicherzeile, eine Einheit zur mathematischen Verknüpfung der aus den Speicherzeilen entnommenen Amplitudenwerte.

[0028] Zur Erzeugung einer Darstellung eines unsichtbaren Objektes wird ein Signal, das mit einer beliebigen bekannten Modulationsfunktion, die eine entsprechende Bandbreite des Signals garantiert, moduliert ist (vorzugsweise FM und/oder binär phasenkodiertes, jedoch keine Impuls(AM-Modulation)), in Richtung auf das Objekt ausgesendet und gleichzeitig als Referenzsignal gespeichert. Mindestens ein Empfänger empfängt simultan die an dem Objekt reflektierten Signale. Die reflektierten Signale werden dann gegebenenfalls mit dem als Referenzsignal gespeicherten Sendesignal gemischt und das erhaltene Schwebungssignal n -kanalig spektral zerlegt. Wenn kein Mischer vorhanden ist, wird das Antwortsignal direkt n -kanalig spektral zerlegt.

[0029] Zur spektralen Zerlegung in Echtzeit kann zum Beispiel ein akusto-optischer Prozessor verwendet werden. Es ist aber auch möglich, wenn ein digitalisiertes Signal vorliegt, einen Fast-Fourier-Prozessor oder einen anderen Prozessor, z. B. einen digitalen Wavelet-Prozessor, zu verwenden, mit dessen Hilfe eine schnelle Spektralzerlegung der Signale durchgeführt werden kann.

[0030] Die Ergebnisse der Spektralzerlegung werden zunächst für jeden Reflexionspunkt in einem parallelen Speicher-Schieberegister abgelegt. Gleichzeitig kann die Summe der Amplitudenwerte jedes Schieberegisters gebildet werden und in einer Speicherzeile des Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessors abgelegt werden, falls dieser zum Einsatz kommt.

[0031] Um die Koordinaten der Reflexionspunkte zu ermitteln, können wie bereits erwähnt, bekannte Verfahren, wie die ellipsoidale Backprojektion und Triangulationsverfahren oder dergleichen eingesetzt werden. Die Grundlage dafür bildet, dass die Punkte gleicher Entfernung vom Sender zu den Reflexionspunkten und zum Empfänger auf einem Ellipsoiden liegen. Eine schnellere Lösung, die bei Sichtgeräten mit mehr als einem Empfänger und digitaler Signalverarbeitung wesentliche Vorteile liefert und diese erst in Echtzeit funktionsfähig macht, bietet ein Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessor. Dieser Prozessor ist ebenfalls Bestandteil der vorliegenden Erfindung.

[0032] Wie bereits angedeutet wurde, ist es möglich, die Signalwege d_i über die Messung der Schwebungsfrequenzen Δf_i mit Hilfe der Formel

$$d_i = \frac{\Delta f_i \cdot T_M \cdot c}{M}$$

(wobei c die Schallgeschwindigkeit, T_M die Zeitdauer des Sendesignals und M die Deviation des Sendesignals ist) bestimmen. Der Zeitverlauf der Schwebungsfrequenzen ist nach der spektralen Zerlegung des Schwebungssignals im parallelen Speicher-Schieberegister abgelegt worden. D. h., für jedes Δf_i (also jeden Ellipsoiden) erhält man ein Spektrum, welches die spektralen Anteile aller Reflexionspunkte

auf diesem Ellipsoiden enthält. Die Anzahl n der Kanäle bei der Spektralzerlegung gibt entsprechend der obigen Formel eine obere Schranke für die Auflösung des Bildes. Aus den Schnittpunkten dieser Ellipsoiden ergibt sich ein Koordinatensystem, das nicht metrisch ist. Um diese Schnittpunkte trotzdem in einem metrischen Raum sichtbar zu machen, kann hier eine spezielle Zusatzoptik (z. B. spezielle Korrekturlinse) vor den Bildschirm oder das HDM (Head Mounted Device) eingesetzt werden. Der durch die Schnittpunkte der Ellipsoiden gegebene Raum kann auch in einen metrischen Raum, der für die Visualisierung günstig ist, eindeutig durch eine Transformation umgewandelt werden. Jedoch erhält man hierbei keine gleichmäßige Verteilung der darzustellenden Punkte im Raum.

[0033] Bei der Anwendung des Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessor im digitalen Verfahren wird zuerst ein euklidisches Raster im über das Beschallungsvolumen gelegt, d. h. ein Raster mit vorteilhafterweise, aber nicht notwendigerweise gleichmäßigen Abständen (günstig im Samplingabstand) zwischen den Punkten in horizontaler und vertikaler Richtung. Aus den x,y,z-Koordinaten der Rasterpunkte können nun die Wege vom Sender zum Rasterpunkt (R_0) sowie die Wege vom Rasterpunkt zum jeweiligen Empfänger (R_1 , R_2 , R_3 bei 3 Empfängern) mit Hilfe des Satzes des Pythagoras abgeleitet werden. Die Summen dieser errechneten Wege R_0+R_1 , R_0+R_2 und R_0+R_3 entsprechen aber nicht notwendig einem Samplingpunkt im Antwortsignal. Außerdem bilden die Samplingpunkte der Antwortsignale jedes Kanals einen eigenen Raum, der nicht linear auf den Raum der Samplingpunkte eines anderen Kanals abgebildet werden kann (siehe Fig. 6). D. h., die Empfänger sehen unterschiedliche Teilräume der beschallten Struktur (ähnlich der RGB-Maske beim Farb-TV). Man kann diesen Effekt auch als Maskeneffekt beschreiben, wobei jeder Empfänger die beschallte Struktur durch eine Maske sieht, welche durch die Samplingfrequenz sowie die Lage des Empfängers eindeutig definiert ist. Demzufolge können die Masken der einzelnen Empfänger nicht durch eine lineare Abbildung zur Deckung gebracht werden.

[0034] Deshalb wird für jeden Rasterpunkt eine δ -Umgebung ($\delta \geq$ Rasterabstand) festgelegt. Für alle Samplingpunkte, die innerhalb dieser δ -Umgebung liegen, werden die Amplitudenwerte, die im Speicherregister des Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessors abgelegt wurden, gemittelt. Wenn δ groß ist, erhält man eine Glättung. Wenn δ kleiner ist als $\sqrt{3}/2$ mal dem Rasterabstand im 3D-Raster ($1/\sqrt{2}$ mal dem Rasterabstand im 2D-Raster), geht Information verloren. Hieraus ergibt sich ein einfacher Weg für das "Zoom-out", mit dem Speicherplatz und Rechenzeit gespart werden kann. Hierfür kann das Raster von vornherein grober gewählt werden. Dann werden nur die zu diesen Rasterpunkten gehörigen Wege R_0+R_1 , R_0+R_2 und R_0+R_3 berechnet. Je nach Rastergröße und der Festlegung von δ wird dann über eine entsprechend höhere Anzahl von Samplingpunkten gemittelt. Analog kann man vorgehen, wenn eine höhere Detailgenauigkeit erreicht werden soll. Angenommen, die Samplingfrequenz ist kleiner als die Nyquistfrequenz des Empfangssignals. Dann treten laut dem Abtasttheorem Aliasing-Effekte auf. Bei einer geschickten Filterung und der Wahl des Rasterabstandes ist dieses jedoch nicht als Störfaktor anzusehen. Dann ist die Rastergröße durch diesen Samplingabstand nach unten beschränkt. Ist die Samplingfrequenz größer, z. B. durch Oversampling, dann kann hier eine noch größere Detailgenauigkeit erreicht werden, da dann in dem entsprechend kleineren Rasterausschnitt (Voxel) immer noch Samplingpunkte enthalten sind, die Information beinhalten.

[0035] Da auch hier, genau wie im analogen Fall, die

Spektren aller Punkte, die auf einem Ellipsoiden liegen, überlagert sind, müssen auch hier wie bei der Computer-Tomographie für jeden Kanal des Spektrums Rückprojektionen durchgeführt werden, die das Spektrum jedes einzelnen darzustellenden Punktes liefern.

[0036] Die Wahl des Rasterabstandes kann auch lokal unterschiedlich erfolgen, somit auch die Festlegung von δ , welches dem Rasterabstand angepasst werden sollte. Dies ermöglicht ein lokales Zooming (wie z. B. beim Vogelaugen). Man kann z. B. den Nahbereich detaillierter darstellen als den Fernbereich bzw. den Fernbereich ausschnittsweise detailliert darstellen. Die eigentliche Detail-Information bleibt dabei grundsätzlich in den Daten enthalten, es wird nur die Darstellung besonders nutzerfreundlich, und Rechenzeit wird gespart.

[0037] Um jeden Raumpunkt in 1D, 2D oder 3D mit nun gegebenem Spektrum klassifizieren zu können, werden die Spektren aus dem Speicherschieberegister parallel ausgelesen und es wird ein statistisches Klassifikationsverfahren, z. B. nächste Nachbarn, neuronales Netz, Support-Vector-Machine und der gleichen darauf angewendet.

[0038] Die Auswahl des statistischen Klassifikationsverfahrens hängt im wesentlichen von der Fähigkeit zur Verallgemeinerung und der Geschwindigkeit der Rechentechnik ab. Die Fähigkeit zur Verallgemeinerung bedeutet die Fähigkeit, einen Reflexionspunkt korrekt zu klassifizieren, dessen Klassenzugehörigkeit vorher nicht bekannt ist.

[0039] Das Verfahren kann dahingehend erweitert werden, dass genau die Frequenzbereiche im Signal ausgewählt werden, mit deren Hilfe eine für die gegebene Struktur "beste" Klassifikation möglich ist. Dafür kann dann erneut ein Sendesignal ausgesendet werden, aber diesmal mit einer nicht konstanten Modulationsfunktion, sondern mit einer Modulationsfunktion, die hauptsächlich die Frequenzbereiche enthält, die für eine optimale Klassifikation ("Farbzurordnung") der Reflexionspunkte benötigt werden. Diese "optimalen" Frequenzbereiche können z. B. mit Hilfe der Analyseeinheit, die mit dem Klassifikator verbunden ist, selektiert werden. Genau diese Bereiche werden dann im nächsten Durchlauf vom Generator erzeugt und gesendet.

[0040] Mit diesem Gerät kann deshalb genau der Frequenzbereich, d. h. das Spektrogramm, ermittelt werden, in dem eine maximale Reflexion der Sendesignale hervorgerufen wird. Es kann damit eine akustische Impedanz, durch die die Oberfläche eines Gegenstandes charakterisiert ist, "scharf" eingestellt werden bzw. seine "akustische Farbe" genauer bestimmt werden. Übergänge gleicher "akustischer Farbe" besitzen gleiche Eigenschaften und werden als gleiche Gegenstände ermittelt. Alle Reflexionspunkte mit gleichen Eigenschaften können geschlossen dargestellt werden. Da das sich ergebende Spektrum eine Eigenschaft ("Farbe") der Oberfläche eines Gegenstandes ist, an dem die Reflexion erfolgte, spielen die Erfahrungen eines Betrachters jetzt eine untergeordnete Rolle.

[0041] Mit diesem Verfahren ist es also möglich, Objekte wahrzunehmen, die für das menschliche Auge durch Rauch, Nebel, Dunkelheit, einen Temperaturvorhang, durch trübes Wasser oder dergleichen verdeckt sind. Mit dieser Vorrichtung werden alle Informationen, die über die Objektoberfläche in den Reflexionen des beliebigen modulierten Ultraschalls enthalten sind, ausgenutzt. Werden gleichzeitig mehrere Sichtgeräte eingesetzt, können z. B. bei jedem Gerät andere Modulationen der Sendesignale vorgenommen werden, um die Signale zu unterscheiden.

[0042] Die Erfindung soll nachfolgend anhand eines Ausführungsbeispiels näher erläutert werden. In den Zeichnungen bedeuten gleiche Bezugszahlen gleiche oder ähnliche Teile.

[0043] Fig. 1A und Fig. 1B zeigen Blockschaltbilder eines aktiven Ultraschall-Sichtgerätes entsprechend der vorliegenden Erfindung für den 1D- bzw. 3D-Raum;

[0044] Fig. 2 zeigt eine grafische Darstellung zur Erläuterung der Frequenzverschiebung zwischen dem Sendesignal und dem Antwortsignal;

[0045] Fig. 3 zeigt eine grafische Darstellung der spektralzerlegten Reflexionssignale;

[0046] Fig. 4 zeigt ein Speicher-Schieberegister, wie er in der Erfindung eingesetzt wird;

[0047] Fig. 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessors;

[0048] Fig. 6 ist eine Darstellung der unterschiedlichen Räume, die von den Samplingpunkten verschiedener Empfänger gebildet werden; und

[0049] Fig. 7 ist eine Darstellung des durch den Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessor gebildeten Rasters.

[0050] Fig. 1A zeigt ein Blockschaltbild eines aktiven Ultraschall-Sichtgerätes entsprechend der vorliegenden Erfindung für eine eindimensionale Anwendung. Das aktive Ultraschall-Sichtgerät besteht in diesem Fall aus einem Sender 1, der mit einem Modulator 4, einem Generator 5 und einer Einrichtung zur Signalkonditionierung 3 gekoppelt ist, und einem Empfänger 2 mit einer Einrichtung zur Signalkonditionierung 3. Das aktive Ultraschall-Sichtgerät besteht weiterhin aus einer Zeitsteuerung 10, die die Signalverarbeitung beginnend mit dem Start des Sendesignals bis zur Darstellung eines Ultraschallbildes zeitlich steuert. Empfängerseitig folgt der Einrichtung zur Signalkonditionierung 3 ein Mischer 6, der die Antwortsignale mit dem Sendesignal mischt, um die Schwebungsfrequenzen zu erhalten, die die Reflexionen anzeigen. Auf den Mischer 6 folgt eine Einheit zur spektralen Zerlegung 9 der Schwebungsfrequenzen, z. B. ein akusto-optischer Prozessor. Die Einheit zur spektralen Zerlegung 9 kann in diesem Fall auch von einem holographischen Wavelet-Prozessor oder einer anderen Einheit zur schnellen analogen Spektralzerlegung durchgeführt werden. Für jeden Reflexionspunkt wird ein Signal erzeugt, das die Information über den Weg des Signals vom Sender über den Reflexionspunkt zum Empfänger und das Spektrum des Reflexionspunktes enthält und das in einem Speicher-Schieberegister 12 abgelegt wird. Dem Speicher-Schieberegister 12 folgen zwei Schaltungen, die die in den Signalen enthaltenen Informationen selektieren bzw. bewerten, eine Schaltung zur Bestimmung der Koordinate 15 des Reflexionspunktes und eine Schaltung zur Klassifizierung 14 des Reflexionspunktes, die zur Darstellung auf einem Display 16 geführt werden.

[0051] In Fig. 1B ist ein Blockschaltbild eines aktiven Ultraschall-Sichtgerätes entsprechend der vorliegenden Erfindung für den 3D-Raum und mit einer digitalen Signalverarbeitung dargestellt. Es kann hier also eine dreidimensionale Darstellung von Ultraschallbildern erfolgen. Das aktive Ultraschall-Sichtgerät besteht in diesem Fall aus einem Sender 1 und drei Empfängern 2. Das aktive Ultraschall-Sichtgerät besteht weiterhin aus einer Zeitsteuerung 10, die die Signalverarbeitung beginnend mit dem Start des Sendesignals bis zur Darstellung eines Ultraschallbildes steuert. Je eine Einrichtung zur Signalkonditionierung 3 ist nach jedem Empfänger 2 angeordnet. Die Signalkonditionierung 3 balanciert die Ungleichmäßigkeiten der Reflexionssignale aus, die von den Empfängern 2 empfangen werden. Der Einrichtung zur Signalkonditionierung 3 folgt je ein Mischer 6, der die Reflexionssignale jeweils mit dem Sendesignal mischt, um die Schwebungssignale zu erhalten, die die Reflexionen anzeigen. Auf den Mischer 6 folgt je ein A/D-Wandler 7 und eine Einheit zur spektralen Zerlegung 9, die die Schwebungssignale spektral zerlegen. Die Einheiten zur spektralen Zerle-

gung 9 können in diesem Fall durch einen digitalen Wavelet-Prozessor, eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) oder eine andere Einheit zur schnellen digitalen Spektralzerlegung erfolgen.

[0052] Jeder Kanal der Spektralzerlegung enthält die Information über den Weg des Signals vom Sender 1 über alle Reflexionspunkte auf dem Ellipsoiden, der durch diesen Kanal bestimmt ist, zum Empfänger 2 und das übereinander gelagerte Spektrum dieser Reflexionspunkte. Diese Signale werden in einem Schieberegister 12 abgelegt. Die Summen der Zellen der Schieberegister 12 werden in einem Speicherregister 13 abgelegt, das Bestandteil des Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessors ist. Dem Speicher-Schieberegister 12, 13 folgen zwei Schaltungen, die die in den Signalen enthaltenen Informationen selektieren und bewerten, eine Schaltung zur Bestimmung der Koordinate 15 der Reflexionspunkte und eine Schaltung zur Klassifizierung 14 der Reflexionspunkte, die zur Darstellung auf einem Display 16 geführt werden.

[0053] Die Fig. 2 und Fig. 3 dienen der Erläuterung der Erfassung der Reflexionssignale. In Fig. 2 ist auf der x-Achse die Zeit, auf der y-Achse die Frequenz aufgetragen. Das Sendesignal besitzt die Frequenz f_s , das Reflexionssignal die Frequenz f_e und die Frequenzverschiebung beträgt $\Delta f \cdot f_s$ besitzt eine Zeitdauer von $T_M \cdot M = f_{\max} - f_{\min}$ ist die Deviation des Signals. Das Reflexionssignal mit den Frequenzen f_e kommt nach einer Zeit Δt zurück. Es gilt:

$$\frac{T_M}{M} = \frac{\Delta t}{\Delta f}$$

$$c = \frac{d}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow d = \frac{\Delta f \cdot T_M \cdot c}{M}$$

[0054] Wird eine konstante Schallgeschwindigkeit, wie sie in einem homogenen Medium vorkommen würde, angenommen, so ist Δf konstant über die Zeit. Kann Δf gemessen werden, dann kann der Weg d vom Sender über den Reflexionspunkt zum Empfänger mit Hilfe der bekannten Größen T_M , M , c und Δf berechnet werden. Im allgemeinen Fall kann die obige Formel durch

$$\frac{T_M}{M} = \frac{\partial t}{\partial f}$$

ersetzt werden.

[0055] Wird nun das Schwebungssignal spektral zerlegt, so erhält man Fig. 3. Es sind dieses die Signale, die in jedem Empfänger-Kanal getrennt verarbeitet werden. Die Gerade

$$\Delta t = \frac{\Delta \text{Weg}}{c}$$

ergibt sich getrennt dadurch, dass das Antwortsignal aus verschiedenen Tiefen der Struktur zu verschiedenen Zeiten am Empfänger eintrifft.

[0056] Bevor jedoch eine FFT oder eine andere schnelle Spektralzerlegung des Schwebungssignals vorgenommen wird, muss die Anzahl n der Kanäle festgelegt werden. Mit dieser Zahl n (z. B. $n = 1024$) wird eine obere Grenze für die

Auflösung des Bildes gegeben. Für jede Schwebungsfrequenz Δf_i , $i = (1, \dots, n)$, bekommt man nun eine Reihe von Amplituden über die Länge des Signals bzw. vom Zeitpunkt des Aussendens bis zum Empfang des letzten Signals vom am weitesten entfernten Reflektor. Im Kanal Δf_i erhält man eine Superposition von Anteilen dieser Schwebungsfrequenz Δf_i in allen Antwortsignalen mit einer Laufzeit Δt_i , d. h. von allen Reflektoren, die auf einem gedachten Ellipsoiden liegen, der Sender und Empfänger als Brennpunkte hat. Bei einer 1024-kanaligen Spektralzerlegung (z. B. FFT) werden alle 1024 Kanäle parallel in den Speicher geführt, d. h. mit jedem Zeitschritt, der durch die Zeitsteuerung gesteuert wird, werden 1024 Werte eingelesen. Da die Reflexionssignale aus tieferliegenden Bereichen später zurückkommen, erhält man die von links nach rechts zunehmende Verschiebung Δt . Aus dem Speicher-Schieberegister 12, 13 werden Signale an die Rekonstruktionseinheit 15 übergeben, die jeweils den zurückgelegten Weg jedes einzelnen Antwortsignals sowie das überlagerte Spektrum aller der Reflexionspunkte enthält, die auf der Oberfläche des diesem Weg entsprechenden Ellipsoiden liegen.

[0057] Im Speicherregister des Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessors befinden sich nach der spektralen Zerlegung 9 dann z. B. $n = 1024$ ($n = \text{Anzahl der Kanäle bei der Spektralzerlegung 9}$) Werte, die sich wiederum aus der Summe derselben über die Zeit ergeben, d. h. $n = 1024$ Amplitudenwerte (Attribute).

[0058] Für die Bestimmung der genauen 3D-Positionen, d. h. der Raumkoordinaten der Reflexionspunkte, können bekannte Rekonstruktionsalgorithmen, wie z. B. Ellipsoide Backprojection oder Triangulation verwendet werden. Die Verwendung eines Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessors bietet jedoch einen entscheidenden Zeitvorteil gegenüber den anderen genannten Verfahren.

[0059] In Fig. 5 ist der Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessor dargestellt. Der Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessor besteht aus einem Rastergenerator 19, einer Einheit 18 zur Bestimmung der Wege der Signale von dem Sender 1 zu den Rasterpunkten und Einheiten 17 zur Bestimmung der Wege der Signale von den Rasterpunkten zu den einzelnen Empfängern 2 für jeden Rasterpunkt, dem bereits erwähnten Speicherregister 13 für die zum Empfänger 2 gehörenden Summe der Amplitudenwerte der Reflexionspunkte, einem Sampling-Address-Generator 21 zur Bestimmung der Adresse des zu dem jeweiligen Empfänger 2 gehörenden Speicherregisters 13 und einer Einheit zur mathematischen Verknüpfung 22 der aus den Speicherregistern 13 entnommenen Werte, sowie einer Einheit 23 zur Übergabe der δ -Umgebung und der Samplingfrequenz an den Sampling-Address-Generator 21.

[0060] Durch den Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessor wird zuerst ein virtuelles euklidisches Raster über das Beschallungsvolumen gelegt, wobei ein Raster mit gleichmäßigen Abständen (optimal im Samplingabstand) zwischen den Punkten in horizontaler und vertikaler Richtung vorteilhaft ist. Dazu sind Sender 1 und Empfänger 2 mit einem Rastergenerator 19 gekoppelt. Fig. 7 zeigt ein solches Raster der einfacheren Darstellung wegen hier in 2D.

[0061] Aus den x , y , z -Koordinaten der Rasterpunkte können dann die Wege vom Sender 1 zum Rasterpunkt (R0) sowie die Wege vom Rasterpunkt zum jeweiligen Empfänger 2 (R1, R2, R3 bei 3 Empfängern) mit Hilfe des Satzes des Pythagoras abgeleitet werden. Die Summen dieser errechneten Wege R0+R1, R0+R2 und R0+R3 entsprechen aber nicht notwendig einem Samplingpunkt im Antwortsignal. Wie bereits beschrieben bilden die Samplingpunkte der Antwortsignale jedes Kanals einen eigenen Raum, der nicht linear auf den Raum der Samplingpunkte eines anderen Kanals

abgebildet werden kann. Zur Veranschaulichung dieses Effektes dient die Fig. 6. Deshalb ist eine Einheit zur Festlegung einer δ -Umgebung für jeden Rasterpunkt 23 vorgesehen. Für alle Samplingpunkte, die innerhalb dieser δ -Umgebung liegen, werden mit Hilfe der Einheit zur mathematischen Verknüpfung 22 die Amplitudenwerte gemittelt. Wenn δ groß ist, erhält man eine Glättung. Wenn δ kleiner ist als $\sqrt{3/2}$ mal dem Rasterabstand im 3D-Raster ($1/\sqrt{2}$ mal dem Rasterabstand im 2D-Raster, gehen Informationen verloren. Hieraus ergibt sich ein einfacher Weg für das "Zoom-out", bei dem Speicherplatz gespart werden kann. Hierfür kann das Raster von vornherein grober gewählt werden. Dann werden nur die zu diesen Rasterpunkten gehörigen Wege R0+R1, R0+R2 und R0+R3 berechnet. Je nach Rastergröße wird dann über eine entsprechend höhere Anzahl von Samplingpunkten gemittelt.

[0062] Analog kann man vorgehen, wenn eine höhere Detailgenauigkeit erreicht werden soll. Angenommen, die Samplingfrequenz ist kleiner als die Nyquistfrequenz des Empfangssignals. Dann treten laut dem Abtasttheorem Aliasing-Effekte auf. Bei einer geschickten Filterung und der Wahl des Rasterabstandes ist dieses jedoch nicht als Störfaktor anzusehen. Dann ist die Rastergröße durch diesen Samplingabstand nach unten beschränkt. Ist die Samplingfrequenz größer, z. B. durch Oversampling, dann kann hier eine noch größere Detailgenauigkeit erreicht werden, da dann in dem entsprechend kleineren Rasterausschnitt (Voxel) immer noch Samplingpunkte enthalten sind, die Information beinhalten.

[0063] Da auch hier genau wie im analogen Fall die Spektren aller Punkte überlagert sind, die auf einem Ellipsoiden liegen, müssen auch hier wie bei der Computer-Tomographie für jeden Kanal des Spektrums Rückprojektionen durchgeführt werden, die das Spektrum jedes einzelnen darzustellenden Punktes liefern.

[0064] Die Klassifikationseinheit 14 ist mit der Rekonstruktionsschaltung 15 gekoppelt und bewertet die Spektren der einzelnen Reflexionspunkte, die gemäß Fig. 4 im Speicher-Schieberegister 12, 13 gespeichert sind. Abhängig von den Eigenschaften der Reflexionspunkte treten in den Reflexionssignalen Veränderungen auf. Falls diese Veränderungen und damit der Charakter der Reflexionspunkte bereits bekannt ist, können die Eigenschaften für die Visualisierung entsprechend gekennzeichnet werden. Die Koordinaten der einzelnen Reflexionspunkte und deren Eigenschaften werden danach auf einem Display 16 zusammengeführt.

[0065] Für die Visualisierung kommen hauptsächlich zwei Möglichkeiten in Frage, zum einen die stereoskopische Visualisierung (z. B. für Personen oder Roboter) oder die direkte dreidimensionale Darstellung (z. B. für die Kartographie), die zweidimensional erfolgt.

[0066] Um die ausgesendete Energie zu verringern, kann erneut ein Sendesignal ausgesendet werden, das aber diesmal mit einer nicht konstanten Modulationsfunktion moduliert ist, bei der hauptsächlich nur die Frequenzbereiche enthalten sind, die für eine optimale Klassifikation ("Farbzuordnung") der Reflexionspunkte benötigt werden.

Aufstellung der verwendeten Bezugszeichen

- 1 Sender
- 2 Empfänger
- 3 Signalkonditionierung
- 4 Modulator
- 5 Generator
- 6 Mischer
- 7 A/D-Wandler
- 8

- 9 spektrale Zerlegung
- 10 Zeitsicherung
- 11
- 12 Schieberegister
- 13 Speicherregister 5
- 14 Schaltung zur Klassifizierung
- 15 Schaltung zur Bestimmung der Koordinaten
- 16 Display

Patentansprüche

10

1. Aktives Ultraschall-Sichtgerät mit mindestens einem Sender zum Aussenden eines Sendesignals mit einer beliebigen bekannten Modulationsfunktion und einer mediumabhängigen Bandbreite des Signals, mindestens einem in einer bekannten Position dazu angeordneten Empfänger, denen jeweils eine erste Signalverarbeitungseinheit zur n-kanaligen spektralen Zerlegung der von den Empfängern aufgenommenen Antwortsignale aus dem Medium und einem Speicher-Schieberegister nachgeordnet ist, einer zweiten Signalverarbeitungseinheit zur Bestimmung der Raumkoordinaten der Reflexionspunkte und einem Display. 15
2. Aktives Ultraschall-Sichtgerät nach Anspruch 1, bei dem die Empfänger symmetrisch zum Sender angeordnet sind. 20
3. Aktives Ultraschall-Sichtgerät nach Anspruch 1 oder 2, bei dem den Empfängern jeweils ein Mischer zur Erzeugung der Schwebungsfrequenz zwischen dem Sendesignal und dem Antwortsignalen nachgeordnet ist. 25
4. Aktives Ultraschall-Sichtgerät nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem jeweils vor den ersten Signalverarbeitungseinheiten zur n-kanaligen spektralen Zerlegung ein A/D-Wandler vorgesehen ist. 30
5. Aktives Ultraschall-Sichtgerät nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem dem Speicher-Schieberegister ein Klassifikator nachgeordnet ist. 35
6. Aktives Ultraschall-Sichtgerät nach Anspruch 5, bei dem dem Klassifikator eine Vorverarbeitungseinheit vorgeschaltet ist. 40
7. Aktives Ultraschall-Sichtgerät nach Anspruch 5 oder 6, bei dem dem Klassifikator eine Analyseeinheit nachgeschaltet ist. 45
8. Aktives Ultraschall-Sichtgerät nach einem der Ansprüche 5 bis 7, bei dem der Klassifikator ein statistischer Klassifikator, wie ein neuronales Netz, eine Support-Vector-Machine oder dergleichen darstellt. 50
9. Aktives Ultraschall-Sichtgerät nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem die erste Signalverarbeitungseinheit zur n-kanaligen spektralen Zerlegung ein akustooptischer Prozessor, ein holographischer Wavelet-Prozessor oder ein ähnlicher analoger Prozessor zur Spektralzerlegung darstellt. 55
10. Aktives Ultraschall-Sichtgerät nach Anspruch 4, bei dem die erste Signalverarbeitungseinheit zur spektralen Zerlegung ein Fast-Fourier-Prozessor, ein digitaler Wavelet-Prozessor oder ein ähnlicher digitaler Prozessor zur Spektralzerlegung darstellt. 60
11. Aktives Ultraschall-Sichtgerät nach Anspruch 4, bei dem die zweite Signalverarbeitungseinheit zur Bestimmung der Raumkoordinaten aus einem Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessor besteht. 65
12. Adaptive-Grid-Reconstruction-Prozessor bestehend aus einem Rastergenerator, einer Einheit zur Bestimmung der Wege der Signale von dem Sender zu den Rasterpunkten und von den Rasterpunkten zu den einzelnen Empfängern für jeden Rasterpunkt, einer

Speicherzeile für die zum Empfänger gehörenden Summen aller Amplitudenwerte über die Kanäle der n-kanaligen spektralen Zerlegung, einem Sampling-Address-Generator zur Bestimmung der Adresse der Amplitudenwerte innerhalb der zum Empfänger gehörenden Speicherzeile, und einer Einheit zur mathematischen Verknüpfung der aus den Speicherzeilen entnommenen Amplitudenwerte.

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

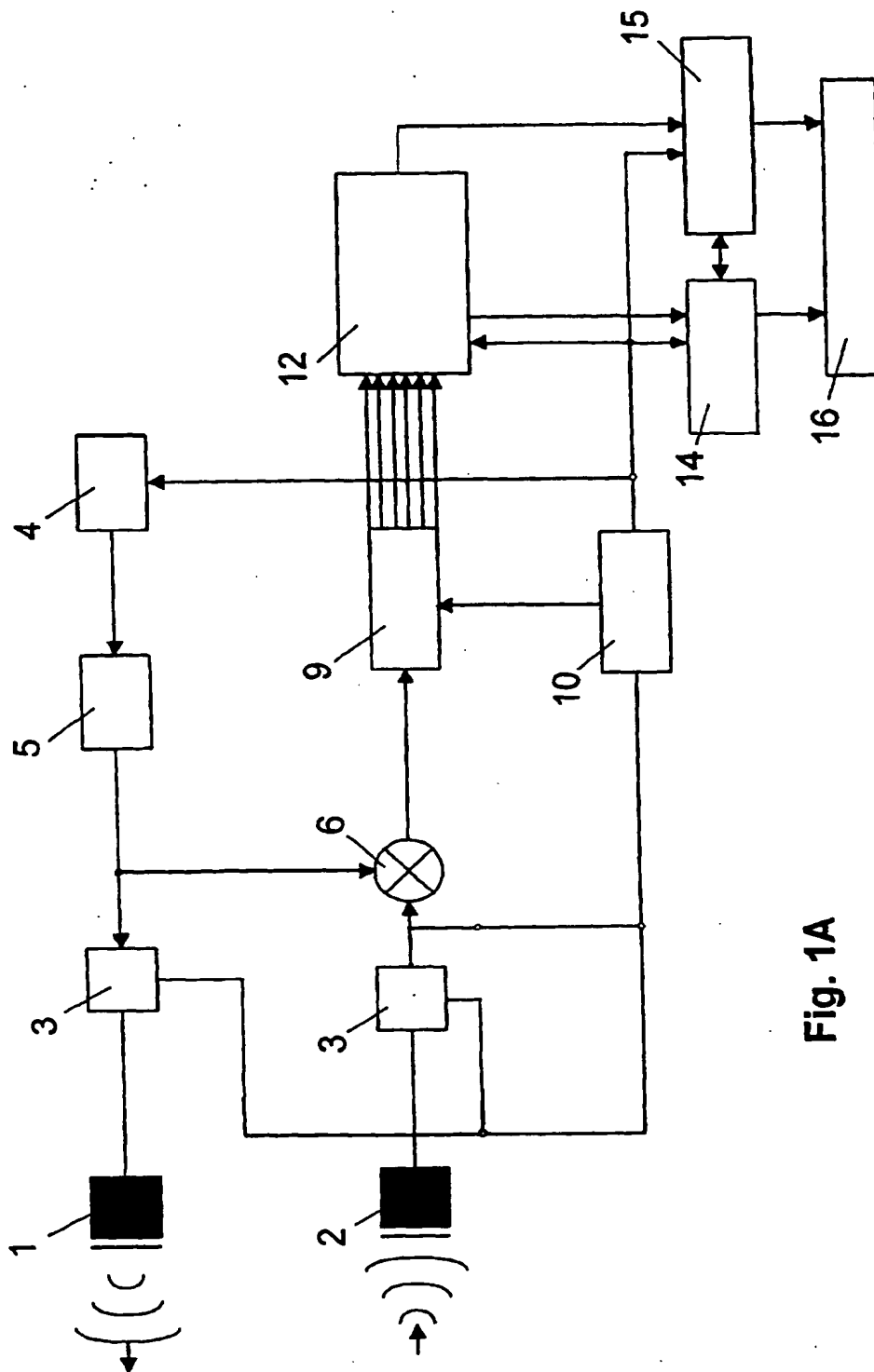


Fig. 1A

BEST AVAILABLE COPY

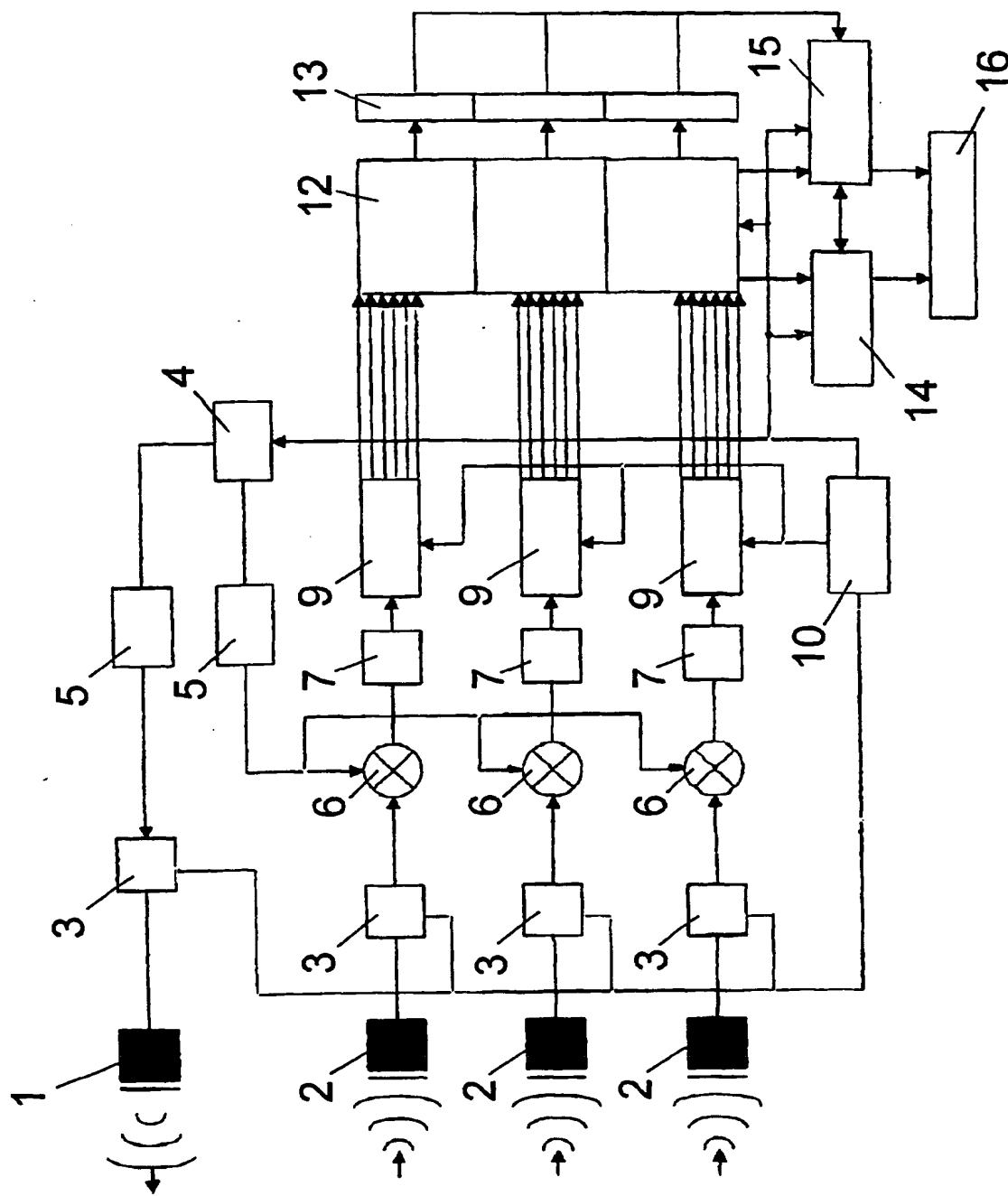


Fig. 1B

BEST AVAILABLE COPY

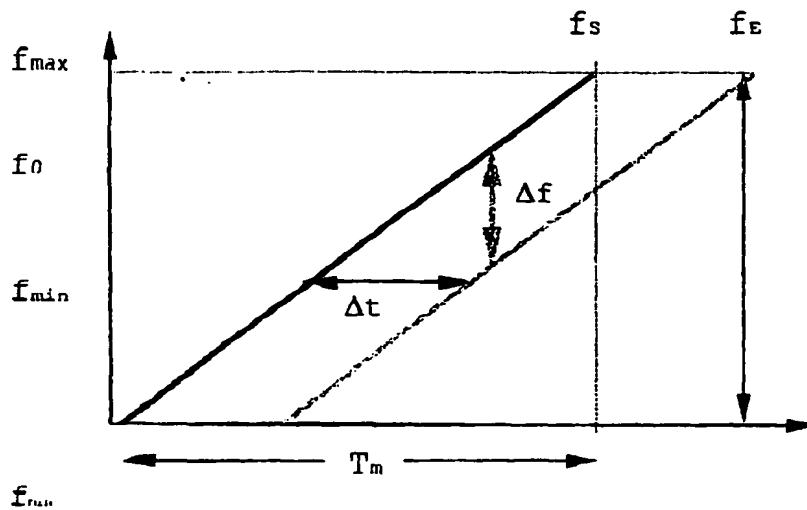


Fig. 2

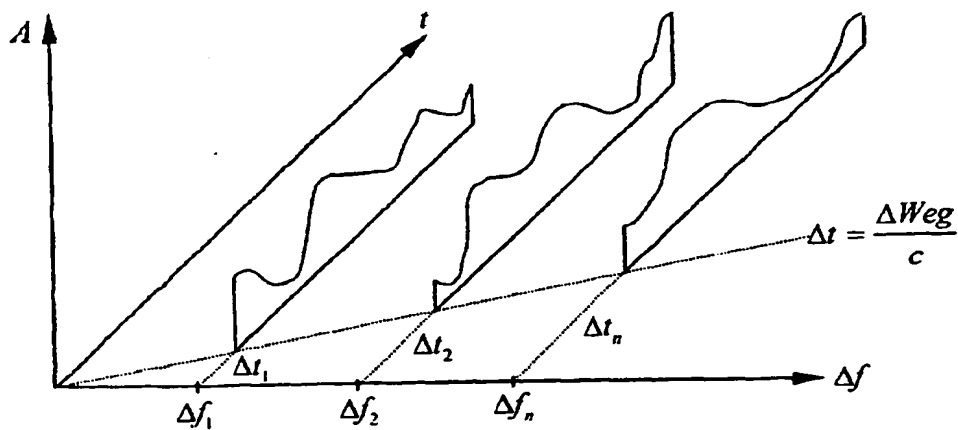


Fig. 3

BEST AVAILABLE COPY

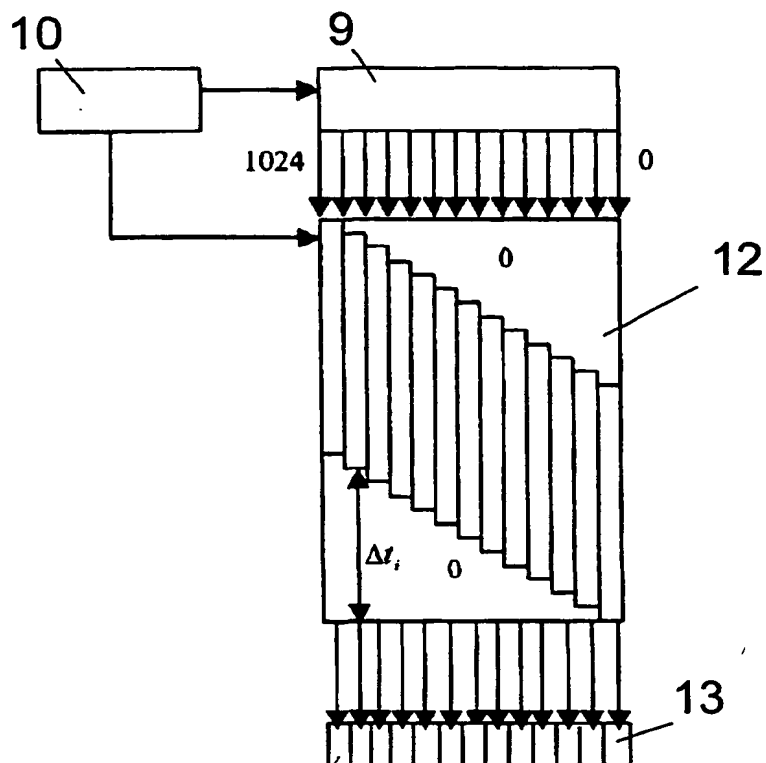


Fig. 4

BEST AVAILABLE COPY

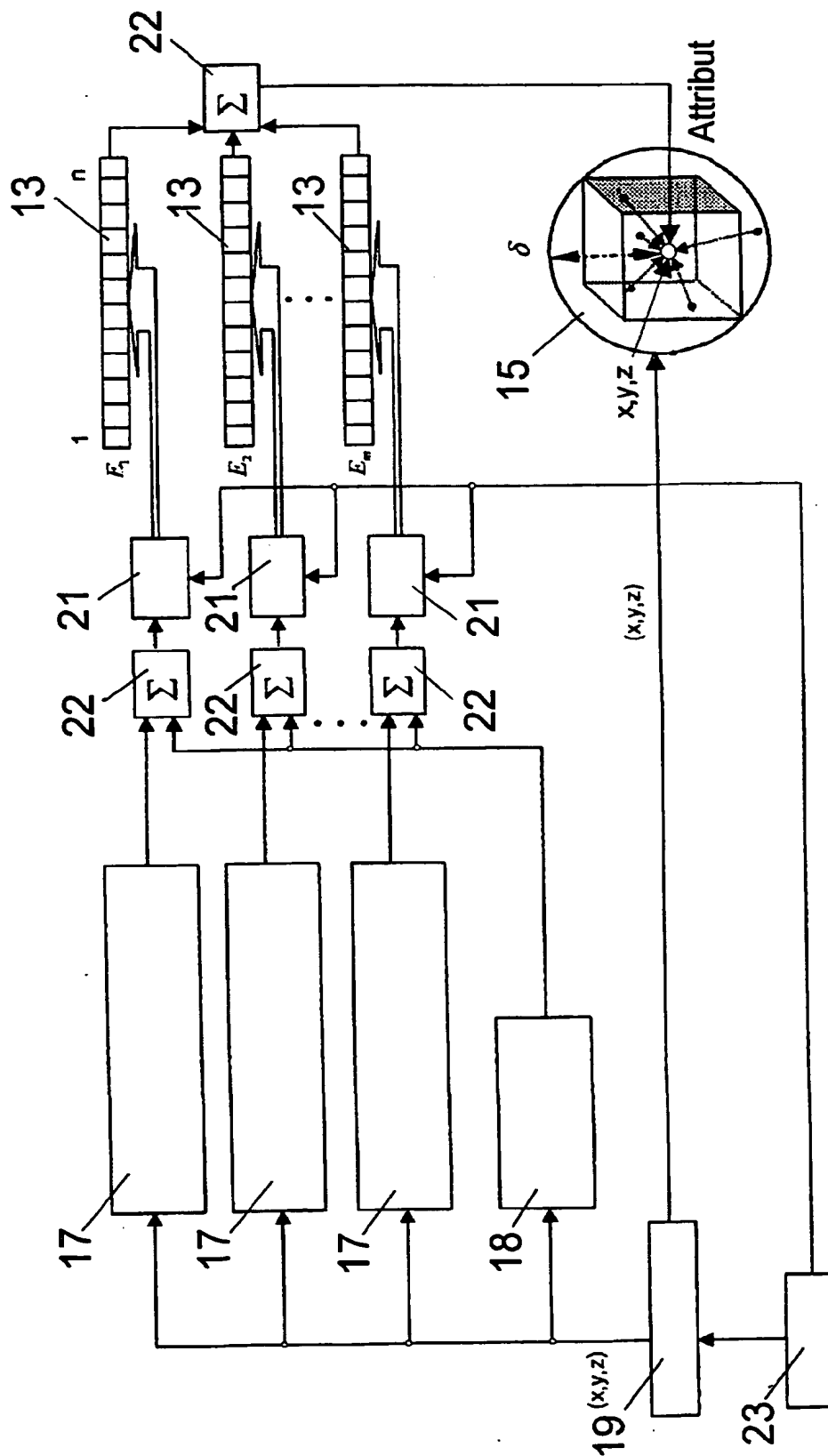


Fig. 5

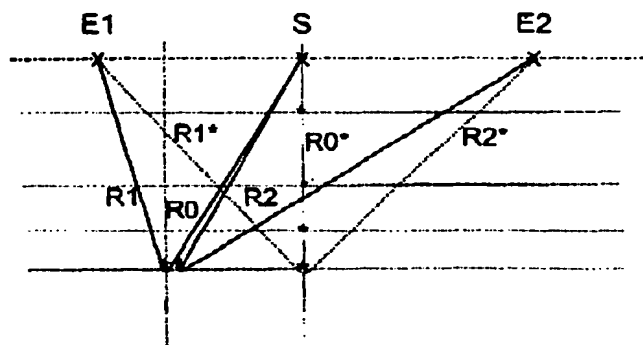


Fig. 6

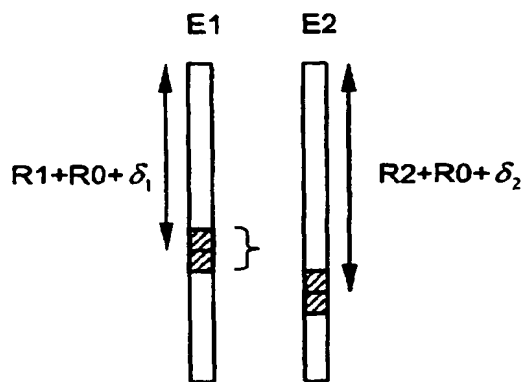
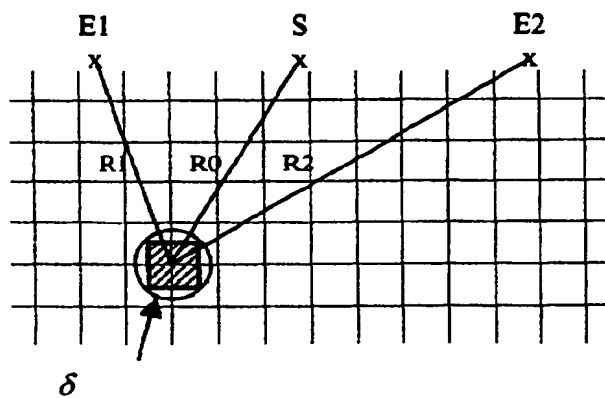


Fig. 7

BEST AVAILABLE COPY